

А.Л. ХАРЧЕНКО, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ» (г. Харьков),
Т.А. КУНАХ (г. Харьков)

ОБОСНОВАНИЕ ЗАДАЧ И МЕТОДОВ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ УЗКОПОЛОСНЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

У статті розглянуті методи вдосконалення параметрів вузькосмугових фільтрів, такі як апроксимація й вагові вікна, а також обґрунтування й можливі шляхи вирішення завдання реалізації оптимальної функції спектрального вікна вузькосмугових фільтрів.

In article methods of improvement of parameters of narrow-band filters, such as approximation and weight windows, and also a substantiation and probable ways of the decision of a problem of realization of optimum function of a spectral window of narrow-band filters are considered.

Постановка проблеми. Фильтрация является одной из самых распространенных операций обработки сигналов, она находит широкое применение в анализаторах спектра и различного рода селективных измерительных приборах и устройствах. Поэтому развитию теории фильтрации, совершенствованию, разработке и исследованию аналоговых и цифровых стационарных узкополосных фильтров (УПФ) уделяется большое внимание.

Анализ литературы. Преимущественное применение в цифровых анализаторах спектра находит цифровая фильтрация, так как она обеспечивает более высокую точность измерения оценки спектральной плотности мощности (СПМ), чем алгоритмы быстрого преобразования Фурье (БПФ), и имеет достаточно простую программно-аппаратную реализацию.

Цель статьи рассмотреть задачи и методы совершенствования узкополосных фильтров для спектрального анализа

Метрологические характеристики фильтровых анализаторов спектра, электрического случайного сигнала $x(t)$, в значительной степени определяются используемыми в них узкополосными фильтрами, работающими в установившемся, или стационарном, режиме (в дальнейшем стационарные фильтры).

Основным элементом фильтровых анализаторов спектра является узкополосный фильтр, который в значительной мере определяет их метрологические характеристики. В настоящее время в анализаторах спектра используются активные узкополосные фильтры [1, 2], которые должны обладать в идеале прямоугольной функцией спектрального окна (ФСО) или АЧХ. Однако известно, что идеальный фильтр физически не реализуем, так как его импульсная характеристика должна изменяться в диапазоне от $t = -\infty$ до $t = +\infty$ [3, 4].

Для приближения реальной ФСО к идеальной либо увеличивают порядок фильтра, что усложняет синтез его параметров и схемную реализацию, либо используют различные способы аппроксимации ФСО. Наибольшее распространение находят так называемые полиномиальные фильтры, в частно-

сти фильтры Баттерворта, Чебышева, инверсный Чебышева, Кауэра (эллиптический), Бесселя, отличие которых один от другого состоит в различном подходе к выбору параметров аппроксимации [4, 5].

Приведенные выше способы аппроксимации идеальной ФСО фильтров применимы только для улучшения отдельных частных показателей их частотных характеристик. Однако ни один из этих показателей не является интегральным и не использует главного для анализаторов спектра критерия – минимума двух важнейших составляющих методической погрешности измерения оценки СПМ, получаемой с применением данного фильтра: погрешности аппроксимации ФСО в полосе пропускания фильтра и погрешности, вносимой боковыми лепестками (пульсациями) ФСО вне полосы пропускания (в полосе заграждения). Эти пульсации ФСО фильтра вблизи точек разрыва (как в полосе пропускания, так и вне её), называемые эффектом Гиббса, вызываются усечением частотного спектра сигнала.

Для уменьшения влияния пульсаций ФСО, а, следовательно, повышения точности анализаторов спектра, широко используются весовые окна [6].

Выбор весовых окон для спектрального анализа осуществляется, в основном, по двум группам показателей:

- по характеристикам ширины полосы пропускания главного лепестка ФСО фильтра на определённом уровне, например половинной мощности;
- по характеристикам боковых лепестков ФСО фильтра, среди которых чаще всего используется два показателя: пиковый уровень боковых лепестков, который позволяет судить о том, насколько хорошо окно подавляет просачивание мощности фильтруемого сигнала, и скорость спадания уровня боковых лепестков, особенно ближайших к главному лепестку ФСО.

Весовые окна позволяют улучшить и даже получить оптимальное значение одного из указанных выше показателей ФСО фильтра.

Применение традиционных методов синтеза полосовых фильтров для аппаратной реализации функций спектрального окна связано с большими теоретическими и техническими трудностями, что обусловлено высоким порядком полосовых фильтров, а, следовательно, и большим числом элементов, необходимых для их построения [1, 3, 4]. Усложнение полосовых фильтров неизбежно ведет к ухудшению надежности и усложнению эксплуатации контрольно-измерительной аппаратуры спектрального анализа. Кроме того, усложнение технических объектов и расширение различных мер по обеспечению их надежности приводит к увеличению затрат на разработку, изготовление и эксплуатацию контрольно-измерительной аппаратуры спектрального анализа.

В связи с этим актуальной является задача поиска новых подходов к реализации оптимальных ФСО узкополосных фильтров, методов фильтрового анализа, позволяющих при заданных точности и достоверности измерения СПМ упростить аппаратную реализацию анализаторов спектра, что, в свою очередь, приведет к повышению их надежности.

Одним из возможных путей решения этой задачи является использова-

ние для построения анализаторов спектра динамических (нестационарных, перестраиваемых) фильтров малых порядков [7, 8]. Поясним их физическую суть. Форма ФСО фильтра, особенно низких порядков, далека от идеальной. Однако если при постоянном коэффициенте передачи фильтра изменять во времени частоту настройки (анализа) и коэффициент затухания фильтра в функции времени, то при определенном выборе законов перестройки этих параметров можно получить требуемую точность аппроксимации идеальной, прямоугольной функции спектрального окна.

Важнейшей особенностью таких фильтров является то, что коэффициент затухания фильтра изменяют так, чтобы его наибольшее значение соответствовало середине полосы пропускания фильтра (т.е. центральной частоте ω_0), а наименьшее значение - краям этой полосы, т.е. $(\omega_0 - \Delta\omega/2)$ и $(\omega_0 + \Delta\omega/2)$.

Отсюда актуальной является задача определения оптимальных законов изменения параметров динамического фильтра, которые обеспечивают, при заданной дисперсии оценки СПМ, минимальную погрешность аппроксимации идеальной функции спектрального окна [9].

В общем случае импульсная передаточная функция элементарного рекурсивного узкополосного цифрового динамического фильтра второго порядка (УЦДФВП) имеет вид [10]:

$$H(z) = \frac{b_2 z^{-2} + b_1 z^{-1} + b_0}{a^2 z^{-2} - 2a \cos \eta z^{-1} + 1}, \quad (1)$$

где $a = e^{-\alpha \tau_d}$; $z = e^{j\eta}$; a , b_0 , b_1 , b_2 – коэффициенты фильтра; α – величина, определяющая затухание частотной характеристики фильтра; τ_d – интервал дискретизации сигнала; $\eta = \omega \tau_d$.

При этом окончательно получим следующее упрощенное выражение для передаточной функции $H_i(z)$ рекурсивного УЦДФВП:

$$H_i(z) = \frac{1 - z^{-2}}{(1 - 2a_i t_d) z^{-2} + 2D h_i z^{-1} + 1} b. \quad (2)$$

$$\text{где } b = 1; a_{2i} = 1 - 2a_i t_d; a_{1i} = 2D h_i. \quad (3)$$

Равенства (3) являются исходными для определения законов перестройки коэффициентов a_{2i} и a_{1i} в зависимости от законов изменения центральной частоты и коэффициента затухания фильтра, т.е. для получения методики синтеза оптимального рекурсивного УЦДФВП. Для иллюстрации на рис. 1 приведены графики ФСО, из которых наглядно видны значительные преимущества УДФВП по погрешности аппроксимации (кривые 1, 2) перед классическим стационарным, неперестраиваемым в процессе анализа, фильтром второго порядка (кривая 3).

Выводы. Динамические цифровые УПФ имеют ряд преимуществ перед стационарными цифровыми фильтрами, основным из которых является возможность обеспечения более высокой прямоугольности ФСО, а, следова-

тельно, и уменьшения относительной погрешности аппроксимации при измерении оценки СПМ с использованием динамического фильтра более низкого порядка, чем цифрового стационарного фильтра. Цифровые фильтры являются основным элементом для построения качественно нового вида измерителей оценки СПМ электрических случайных сигналов – цифровых корреляционно-фильтровых анализаторов спектра с более высокими техническими характеристиками. Переход в таких анализаторах к цифровым динамическим фильтрам является дальнейшим развитием нового направления в спектральном анализе, который основывается на использовании в фильтровых анализаторах спектра динамической фильтрации.

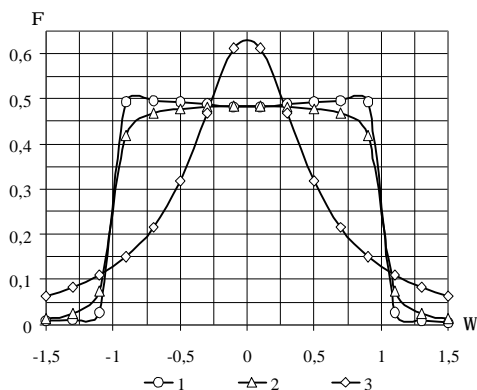


Рис. 1. Функции спектрального окна $\Phi(\Omega)$ фильтров второго порядка: кривая 1 – ФСО для линейного закона перестройки центральной частоты и линейного закона изменения коэффициента затухания УДФВП; кривая 2 – ФСО для линейного закона перестройки центральной частоты при постоянном коэффициенте затухания УДФВП; кривая 3 – ФСО стационарного фильтра

Список литературы: 1. *Дженкинс Д., Дженкинс Дж., Мур Б.* Справочник по активным фильтрам –М.: Энергоатомиздат 1983. 2. *Мэнли Р.* Анализ и обработка записей колебаний. –М.: Машиностроение. –1972. 3. *Зааль Р.* Справочник по расчету фильтров: Пер. с нем. –М.: Радио и связь, 1983. –752с., ил. 4. *Куцко Т.Ю.* Расчет полосовых фильтров. М.-Л., «Энергия», 1965. 192 с. 5. Современная теория фильтров и их проектирование. Под ред. *Г. Темеша, С. Митра.* – М.: Мир, 1977. 6. *Гоноровский И.С.* Радиотехнические цепи и сигналы. –М.: Радио и связь, 1986. –512 с. 7. *Тищенко В.А.* Методика определения параметров нестационарных фильтров по требуемой точности измерения оценки спектральной плотности мощности случайных сигналов //Вестник ХГПУ. –1999. –Вып. 24. С. 46-51. 8. *Чинков В.Н., Тищенко В.А.* Основные направления совершенствования фильтровых методов спектрального анализа // Вестник ХВУ. Системы обробки інформації, випуск 2 (6). 1999. С. 44-47. 9. *Чинков В.Н., Харченко А.Л.* Формулировка и методы решения задачи оптимального синтеза динамического узкополосного фильтра второго порядка для спектрального анализа эргодических случайных сигналов. //Український метрологічний журнал. – 2001. – Вип. 1. – С. 11-14. 10. Рекурсивные фильтры на микропроцессорах / Под ред. *А.Г. Остапенко.* — М.: Радио и связь, 1988. — 128 с.

Поступила в редколлегию 14.11.2008